

## 新しい流速測定法に基づく黒潮・亜熱帯循環系の流動場の研究

著者	石井 春雄
号	37
学位授与番号	1033
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/38257">http://hdl.handle.net/10097/38257</a>

氏名・(本籍)	いし い はる お 石 井 春 雄
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理 第 1 0 3 3 号
学位授与年月日	平 成 6 年 1 月 26 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
最 終 学 歴	昭 和 53 年 3 月 東北大学大学院理学研究科博士課程 地球物理学専攻退学
学位論文題目	新しい流速測定法に基づく黒潮・亜熱帯循環系の流動場の研究
論文審査委員	(主査) 教 授 鳥 羽 良 明      教 授 田 中 正 之 助 教 授 花 輪 公 雄 助 教 授 川 村      宏

## 論 文 目 次

### 要旨

#### 第1章 序 論

1. 1 研究の背景と目的
1. 2 本研究の構成

#### 第2章 船舶搭載型 ADCP による流速測定

2. 1 はじめに
2. 2 ADCP の測定原理と測定誤差の原因について
2. 3 測定流速の補正方法とその適用例
2. 4 ADCP が把えた流れの構造
2. 5 まとめ

第2章付録

第3章 海面漂流ブイによる流速測定

- 3. 1 はじめに
- 3. 2 漂流ブイによる流速測定誤差について
- 3. 3 漂流ブイが把えた黒潮域の流れの構造
- 3. 4 漂流ブイが把えた亜熱帯循環系の流れの構造
- 3. 5 まとめ

第3章付録

第4章 トカラ海峡周辺海域における黒潮の流速・流量について

- 4. 1 はじめに
- 4. 2 船舶搭載型 ADCP 測定流速を用いた黒潮流量の推定
- 4. 3 トカラ海峡における潮位差と黒潮流速・流量との関係
- 4. 4 東シナ海の黒潮流量と北太平洋の風の間との相関
- 4. 5 まとめ

第4章付録

第5章 まとめ

謝辞

引用文献

表および図

## 論文内容要旨

本研究は、近年実用化されてきた船舶搭載型 ADCP と衛星追跡型漂流ブイによる資料に基づき、西部北太平洋の亜熱帯循環系、特に中核の黒潮循環系における流動場の構造を明らかにすることを目的とする。

第1章においては、序論として、本研究の背景と目的を述べるとともに、研究の位置づけを行なった。

第2章では、船上から流速を測定する船舶搭載型 ADCP (音響式ドップラー流速プロファイラー; Acoustic Doppler Current Profiler) について、その有効性を示すとともに、本測器に特有の測定流速誤差と、その補正方法を述べた。超音波の送・受波器を船底に取付け、ドップラー効果を利用して海水の流速を測定する ADCP は、流速場の水平・鉛直方向の詳細な情報を取得するうえで極めて有効である。このことを、筆者らが海上保安庁水路部において、黒潮域を中心に多数実施した流速測定結果から示した。

ADCP は、その導入以前の主要流速測定機器であった GEK (電磁海流計; Geomagnetic Electro Kinematograph) と比較して、以下の特徴を有する。

- ① 長さ数百メートルのケーブル (電らん) の曳航を必要としない。
- ② 船の針路を再三変更せず、航走したまま連続的に流速を測定できる。
- ③ 深さ数百メートルまでの多数層において流速を測定できる。
- ④ 地球磁場の鉛直成分の大きさに依存せず、磁気赤道付近の低緯度海域でも流速を測定できる。

更に ADCP は、地衡流推算が不適当な赤道付近においても流速を測定できる。これらの ADCP の長所を活かすことにより、GEK や地衡流推算では不可能であった時間・空間 (水平・鉛直方向) 的に密な流速場の構造把握が、初めて可能となった。

船舶搭載型 ADCP を用いた場合、流速を得るために対水船速と対地船速が必要である。対水船速を ADCP によって測定するのに対し、対地船速は通常別個の測位装置で測定する。本研究では、ADCP と測位装置の2つのシステムの座標系が相対的にズレた場合、すなわち、音波ビームの方向が設定基準方向からズレた場合に、ADCP 特有の流速測定誤差が発生することを示した。船首方向ビームの船の正しい針路方向からのズレは、特に大きな流速誤差をもたらす。

音波ビームの方向は、通常経験される船の周期的動揺 (ピッチング、ヨーイング等) に伴い、時間的に変動する。これらの動揺を正弦関数で表現したとき、動揺が測定流速値に及ぼす影響について考察し、流速誤差の大きさを見積った。その結果、「船のローリング (横揺れ) の影響は無視できるが、ピッチングやヨーイングは、測定流速の過大評価をもたらす」という結論が導かれた。結論の検証として、「船が向い風を受ける状態では、ADCP 測定流速の方が、GEK 流速よりも大きくなる」という事例をあげ、この測定流速の差が、風波や“うねり”が起こす船

のピッチングの効果として説明されることを示した。また、比較的容易に実施できる流速測定誤差の補正として、ADCP の往復測定データに基づく方法について述べ、この補正方法が有効であることを適用例を挙げて示した。

以上のように、船舶搭載型 ADCP は、大量の流速データを航走したまま取得できる極めて便利な測器であり、表層流速データ生産量のみ比較しても、同じ航海期間における GEK の 50~100 倍に及ぶ。しかし、測定値の精度については十分な吟味が必要である。流速誤差の発生原因の性質上、同一船舶でも観測航海が異なれば誤差の大きさが異なることも起こる。高精度の流速データを取得するために、ADCP の特性を船舶個々に把握しておくことと、観測航海のつど、往復測定を実施して流速値の検証を行うことが勧奨される。

第 3 章では、人口衛星追跡型の海面漂流ブイによる海洋の流速測定について述べた。

ADCP や、地衡流推算に必要な CTD 等の船舶観測が、点あるいは線上の流速情報のみ与える「オイラー」的観測であるのに対し、海水に追従して漂流するブイによる観測は「ラグランジュ」的であり、船舶観測の欠点を補い、海水粒子の動きを数千 km にわたって追跡可能である。

1980 年以来、海上保安庁水路部は筆者らが中心となり、黒潮域・西部北太平洋亜熱帯域において、表層大循環の実態解明を目的とした漂流ブイ調査を続けてきた。その結果、漂流ブイの「ラグランジュ」的観測が、蛇行や渦の挙動など流れの実態を知るうえで、極めて有効な手段であることが示され、海洋の流動場に関する新たな知見をもたらした。特に、慣性周期を持つ流れや、西向きに伝搬する反時計廻りの渦などの発見は、従来の船舶観測では到底不可能であり、漂流ブイによって初めて可能な固有の成果である。

「ラグランジュ」的観測においては、漂流物が海水速度と同じ速度で流れることが要請される。この要請を満たすために工夫される漂流ブイの形状について、ブイに取付けるドロッグ（抵抗布）を中心に最初に述べた。また、漂流ブイの追跡により測定される海面流速は、ブイの移動距離と移動に要した時間から求めるため、漂流ブイの位置決定の精度が流速の精度に直結するが、この位置精度についても述べた。

正確な位置が知られた陸上の地点に置いたブイについて、人口衛星が決定した位置との比較から、位置決定の誤差の大きさを見積った。この結果から、海上で測定される流速の誤差の大きさも見積られた。さらに、日本南方海域におけるブイの漂流速度と地衡流の速度とを比較した。漂流速度の方が大きく算出されるが、両者は明瞭な正の相関関係を示した。

黒潮域に投入された漂流ブイのデータから求めた、緯度・経度 2 度格子の平均流速場は、一般的な黒潮域の循環像を示す。しかし、これは統計処理を施した結果であり、ブイの軌跡に見られる実際の流動は極めて複雑である。

西部北太平洋亜熱帯域の東経 144 度上で投入されたブイの軌跡と格子平均された流速分布から、北緯 17 度付近より北側の海域では、海流と呼べる明確な流れが無く、多くの渦運動に示される擾乱が活発なことがわかった。一方、北緯 17 度の南側では、他の漂流ブイ観測の結果も加えると、北赤道海流をはじめとした東西方向の流れが卓越することがわかった。これらのこと

は、東経144度線に沿った、1000db (deci-bar) 面基準の海面の力学的高度偏差 ( $\Delta D_{0/1000}$ ) の分布からも支持される。 $\Delta D_{0/1000}$  の緯度方向の勾配は、北緯20度以北では小さく殆ど平坦だが、北緯13度付近から8度付近までは大きく、北赤道海流がこの範囲で顕著なことを示す。また、各緯度ごとの  $\Delta D_{0/1000}$  値にフィルターをかけて平滑化し、平滑化の有無による  $\Delta D_{0/1000}$  の標準偏差の大きさを比較した。北緯18度以北では、フィルターをかけた場合に、かけない場合の1/2程度に減少するが、北緯17度以南では、フィルターをかけてもほとんど変わらない。この事実も、北緯18度以北は擾乱運動が活発な海域であることを示している。

西部北太平洋の台湾東方海域には、亜熱帯反流と呼ばれる東向流が存在するとされてる。しかし、漂流ブイの運動を見る限り、台湾東方における東向流は認められない。漂流ブイの追跡結果によるこの事実は、亜熱帯反流の存在を否定はしないが、亜熱帯反流が恒常的に存在する流れではないことを示唆するものである。

漂流ブイは、北太平洋規模の亜熱帯循環系の全体的構造をも明らかにしつつある。約4年半をかけて北太平洋をほぼ一周したブイの軌跡は、亜熱帯循環の東西方向の規模が約1万kmに及ぶことを明らかにした。また、黒潮域に放流された漂流ブイの多くは日本近海から一旦は東へ流れるが、北太平洋東部に至る以前に幾つかの海域で南へと向きを変え、その後は西へ流れる傾向を示す。複数の海域における、これらの南下流の存在は、日本近海から東経180度付近に及ぶ東西規模を持つ北緯20～40度帯の循環が、より小規模な幾つかの循環に分かれていることを示唆している。さらに、これまでに黒潮域に放流された漂流ブイは、北緯20度付近より南には流れていない。この原因は不明だが、西部北太平洋の亜熱帯循環系の構造を解明するうえで、重要な観測事実である。

第4章では、日本南方の黒潮域、特にトカラ海峡周辺海域における黒潮の流速・流量について、船舶搭載型 ADCP による流速データをを用いた解析から明らかになった事実を述べた。また、トカラ海峡周辺の黒潮の流速・流量と、海峡をはさんだ験潮所の潮位・潮位差、北太平洋上の風応力などの時系列を比較して、相互の関連性について調べた。

黒潮の流量を、ADCP 流速と地衡流速を整合させる方法により見積った結果、東シナ海から日本南方に抜ける黒潮のトカラ海峡通過流量は、20～30SV (1SV=10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/秒) であることがわかった。これは、東シナ海の黒潮の平均地衡流量 (約25SV) とほぼ一致するが、50SV 程度とされる本州南方の黒潮地衡流量の約半分である。

トカラ海峡を横断する ADCP 測線上で得られた表面流速と、同時期 (1日～2日) の海峡間の潮位差とを比較した。その結果、表面流速と潮位差との間に地衡流平衡関係が、この程度の短期間においても成立していることがわかった。

また、トカラ海峡においては、黒潮流速に匹敵するほどの潮流が卓越すること、潮流速度は海峡内の場所や水深に依存していることが、流速計の係留結果や、船舶搭載型 ADCP による25時間定点測定の結果から明らかになった。したがって、トカラ海峡を通過する黒潮の流量を求める場合には、測定流速値に含まれる潮流成分を除去する必要がある。このため、海峡部に

適用可能な高精度潮流モデルの確立の必要性が指摘される。

北太平洋上の、理論的に求められるスヴェルドラップ輸送量の時間変動と、黒潮流量の変動の関連を明らかにするために、北太平洋上の風応力  $\tau$  の回転の鉛直成分 ( $[\text{curl}-\tau]_z$ ) と東シナ海の黒潮の地衡流量との相関を調べた。地衡流量は季節ごと、 $[\text{curl}-\tau]_z$  は月ごとに与えられるため、それぞれ4季節または1年の移動平均値(4個/年)を用い、タイム・ラグ(風が先行)を1/4年ごとにとって相関係数を求めた。1972~1981年の地衡流量を用いたときの、ラグ5年未満での相関係数の最大は-0.86(風の範囲は22-18°N, 135°W-120°W; ラグは3.5年)、ラグが5年以上の場合は-0.93(風の範囲は18-12°N, 175°E-165°W; ラグ6.0年)となり、両者の良い相関関係を示す。しかし、1973~1990年の地衡流量を用いると、相関関係は最大-0.70にとどまり(風の範囲は14-10°N, 150°E-170°E; ラグ2.25年)、先に最大値を与えた風範囲とラグ年数での相関係数は-0.60に満たない。時系列を長くすると相関度が減少するのは、黒潮流量、海上風が10年以上の時間規模をもって変動するためと考えられる。

最終章の第5章では、本研究の結果明らかとなった、黒潮をはじめとする西部北太平洋の亜熱帯循環系の構造に関する知見をまとめた。また、これらの結果に基づいて、今後明確にしていかなければならない課題について述べた。船舶搭載型 ADCP 及び海面漂流ブイの活用によって、黒潮域を中心に流動場の実態が急速に明らかにされつつある。しかし、亜熱帯循環系については、その時間・空間変動の完全な理解には未だ至っていない。例えば、亜熱帯循環系における水温場の平均的構造と、流動場の平均的構造とが、どのように関連付けられるのか、また、両者の変動過程はどのような関わり合いを持つのか、という大きな課題が残る。

船舶搭載型 ADCP や漂流ブイは、流速を直接的に測定できるため、海洋の流動場を把握するうえで極めて有効である。しかし、広大な海洋を対象にしたとき、船舶やブイがカバーする場所での測定だけでは不十分であり、広域・同時観測を特色とする、海面高度計などの人工衛星搭載センサーの活用が必要である。現場観測データは衛星データの検証にとって不可欠ではあるが、それ以上の活用方法として、海上現場と宇宙空間とから得られたデータを相補的に解析し、海洋の流動場の変動についての理解を深めていくことが望まれる。そのためにも、船舶搭載型 ADCP と漂流ブイにより、さらに多くの貴重な観測事実が明らかとなることが期待される。

## 論文審査の結果の要旨

石井春雄提出の論文は、近年海上保安庁水路部で採用してきた新しい流速測定資料に基づいて、黒潮を含む西部北太平洋の亜熱帯循環系の流れの場を記述することを目的としたものである。

黒潮などの海流の測定に、1980年代の後半から、船舶搭載型の音響式ドップラー流速プロファイラー(ADCP)が利用できるようになり、船の観測線に沿っての、深さ数百メートルまでの詳細な流れの鉛直断面が得られるようになった。水路部の測量船にもこれが採用され、申請者らが中心となって、多くのデータを得て来た。しかし、測定値がそのまま正しい流速を与えるものではない。

本論文では、まず、ADCPによる測定原理と測定誤差の原因について論じ、正しい流速値に補正する方法を論じ、その適用性を吟味した。地衡流推算では得られない、コリオリの力の働かない赤道付近を含めて、ADCPがとらえた亜熱帯循環系の流れの詳細な構造を提示した。

次に、これも1980年以来可能になった、ラグランジュ的観測方法である人工衛星追跡型の海面漂流ブイによる海水粒子の追跡データを総合している。これも申請者らが中心となって水路部で実施した観測であるが、黒潮域に放流されたブイが、北太平洋全域にわたって漂流した多数の軌跡から、慣性振動や渦運動を始め、これまで知られなかった興味深い事実が得られている。

特に、黒潮続流から南へ向かう流れは、145度E、165度E、および180度E付近にあり、亜熱帯循環系がいくつかの副循環に分かれていることが示唆されたこと、この南下流は20度N以南には入らないことなど、重要な新知見が得られている。

最後に、トカラ海峡を通る黒潮の流量について、ADCPのデータを過去に推定されていたものと比較検討しているが、無流面の仮定から見積られた地衡流量がかなり過大であったことを指摘している。

以上のように、この論文は、近年海上保安庁水路部で採用してきた新しい流速測定法である、ADCPおよび人工衛星追跡型の海面漂流ブイによる観測資料に基づいて、黒潮を含む西部北太平洋の亜熱帯循環系の流れの場を記述し、いくつかの新しい知見を提出したものである。これは申請者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって石井春雄提出の論文は博士(理学)の学位論文として合格と認める。